

様式 C-19

科学研究費補助金研究成果報告書

平成23年 5月24日現在

機関番号： 13401
 研究種目： 基盤研究（C）
 研究期間： 2008～2010
 課題番号： 20560184
 研究課題名（和文） 過熱面上に発生する局所的固液接触の限定抑制機構の解明（可視化計測と数値解析）
 研究課題名（英文） Investigation into Limiting Mechanisms of Localized Liquid-Solid Contact on Superheated Surface by Visualization Measurement and Numerical Analysis
 研究代表者
 永井 二郎（NAGAI NIRO）
 福井大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号： 70251981

研究成果の概要（和文）： 飽和温度以上に過熱された固体表面上に液滴が落下すると、局所的な固液接触が発生→拡大→縮小→消滅する。本研究はこの現象を対象として、固体面の裏側から固液接触状況を可視化・高速度ビデオ撮影し、固液接触直径や発泡点数を計測した。さらに、可視化計測結果を基に、本現象発生時の伝熱現象を数値計算するプログラムを作成し、固体面内の温度分布時間変化を計算した。その結果、局所的固液接触が限定抑制されるプロセスを把握することができた。

研究成果の概要（英文）： When a liquid droplet impacts on a superheated surface, a localized liquid-solid contact appears on the surface, which is to be expanded, limited and extinguished. This research aims to reveal the mechanisms of this phenomenon. Firstly, liquid-solid contact situations were visualized from below the surface and recorded into high speed video camera. Liquid-solid contact diameter and number density of nucleation sites were measured by image processing. Then, based on these visualization measurements results, the numerical simulation program was made to calculate transient heat transfer process during intermittent localized liquid-solid contact occurs on a superheated surface. This program can calculate temperature distribution and its temporal change of the superheated plate. Through visualization experiments and numerical simulations, the process during which a localized liquid-solid contact is limited on a superheated surface was physically grasped.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合 計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2008年度 | 1,500,000 | 450,000 | 1,950,000 |
| 2009年度 | 1,300,000 | 390,000 | 1,690,000 |
| 2010年度 | 700,000 | 210,000 | 910,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総 計 | 3,500,000 | 1,050,000 | 4,550,000 |

研究代表者の専門分野： 伝熱工学、熱工学

科研費の分科・細目： 機械工学・熱工学

キーワード： 沸騰、固液接触、可視化、数値計算、モデル化、三相界線

1. 研究開始当初の背景

(1) 沸騰素過程からの数値シミュレーションの必要性

沸騰現象は工業上、蒸気生成や冷却制御技術として幅広く利用されており、その熱伝達特性は沸騰曲線で表現される。蒸気生成の例としては、火力・原子力発電におけるボイラー等が、冷却制御の例としては、製鋼・熱延工程、焼入れ等の熱処理が挙げられる。このような例では、核・遷移・膜沸騰全ての沸騰領域が関与し、一部に数値シミュレーションが導入されているものの基本的には実験整理式をベースに沸騰熱伝達特性を利用してきた。しかし近年、冷却制御の更なる高度化・安定化のためCAEのニーズが高まり、材料内部構造解析や熱流動の数値解析の境界条件として、沸騰曲線全領域を素過程から数値シミュレーションする技術が強く求められている。

(2) 沸騰素過程に関する根本的な未解決課題

最近、孤立気泡域の核沸騰についてDhirら^[1]は既存核活性化から気泡成長・離脱に至る素過程の数値シミュレーションに成功した。また純粋な膜沸騰については蒸気膜ユニットモデル^[2]による解析的計算も可能となっている。

ところが、局所・間欠的固液接触が発生する遷移沸騰を中心とした領域については、現状では下記Ⅰ～Ⅲの根本的な未解決課題が残っているため、素過程からの数値シミュレーションは極めて困難な状況である。

Ⅰ 熱面での濡れ性評価^[3]

Ⅱ 発泡点の予測（既存核活性化と自発核生成）^[4]

Ⅲ 過熱面上に発生する局所的固液接触の限定抑制機構の解明

Ⅰは、従来の平衡接触角による濡れ性評価の限界が指摘されており、ミクロ・ナノスケールパラメーターによるアプローチが期待されている。Ⅱは、与えられた固体表面と液体の組合せに対して、実験整理式ではなく理論的かつ実施可能な発泡点予測手法が無い点である。Ⅲは、遷移沸騰曲線（特にMHF点の決定）に関わる問題で極めて重要であり、実験的^[5]・解析的^[6]アプローチの研究はあるものの、ⅠとⅡとも関連して解明には至っていない。

(3) 固液接触限定抑制に関する研究の進展と課題

未解決課題Ⅲに関して、最近、門出ら^[7]および大竹ら^[8]の衝突噴流沸騰に関する先駆的研究により、MHF点近傍の過熱面での濡れ開始条件が実験的に明らかになりつつある。こ

れらの結果は、過熱面固体内部の熱伝導と固液界面からバルク液体への熱伝達の連成が重要であることを示唆している。過熱面上に発生した局所的固液接触は、その後消滅して乾燥面に戻るか、あるいは固液接触面が拡大し全面濡れ面へ移行するかに分かれる。低過熱度または固体面熱伝導性が低い場合は、固液界面温度が低く発泡点密度が小さいため、発生した局所的固液接触は拡大し全面濡れ面へと移行する。一方、高過熱度または固体面熱伝導性が高い場合は、固液界面温度が高く発泡点密度が高いため、固液接触領域が縮小し、領域内の乾燥面積割合が増大し、局所的固液接触は限定抑制され乾燥面に戻る。

このプロセスには、過熱面固体内非定常熱伝導と固液接触領域内熱伝達（固液接触界面は、非沸騰時は非定常熱伝導、発泡・蒸発時は相変化）とが連成し、その結果として乾燥面に戻るか濡れ面へ移行するかの臨界条件が決まると思われる。しかし、これまでにこの連成機構をモデル化・数値解析した研究例はほとんど無く、濡れ面移行の臨界条件が発泡点密度と固体面熱物性により表現されていない。

<参考文献>

[1] Dhir, V.K., Trans. ASME, J. Heat Transfer, 128, (2006), pp.1-12. [2] Ohtake, H. et al., Int. J. Heat and Mass Transfer, 36-10, (1993), pp.2541-2552. [3] Nagai, N. & Carey, V.P., Thermal Science and Engineering, 10-2, (2002), pp.1-9. [4] Nagai, N. & Nishio, S., Experimental Thermal and Fluid Science, 12-3, (1996), pp.373-379. [5] 永井・西尾, 第30回伝熱シンポジウム論集, II, (1993), pp.463-465. [6] 西尾・永井, 機論(B編), 58-549, (1992), pp.1490-1497. [7] 門出ら, 機論(B編), 72-714, (2006), pp.383-389. [8] Ohtake, H. et al., Int. J. Heat and Mass Transfer, 47-8, (2004), pp.1965-1977.

2. 研究の目的

過熱面上に発生する局所的固液接触の限定抑制機構（特に、濡れ面移行の臨界条件）を解明するため、落下液滴蒸発系を対象に下記の可視化計測実験と数値解析を行う。

(1) 可視化計測： 透明な過熱面上に落下する液滴の固液接触状況を過熱面裏側から可視化・画像計測し、局所的固液接触領域の動的挙動・発泡点の時間的推移など、濡れ面 or 乾燥面に至るプロセスを把握する。

(2) 数値解析： 可視化計測結果を基に、過熱面内非定常熱伝導と固液接触領域内熱伝達を連成モデル化・計算する（固液接触界面は、非沸騰時は非定常熱伝導、発泡・蒸発時

は相変化の境界条件。発泡点密度は実験値、濡れ性の影響は除外)。

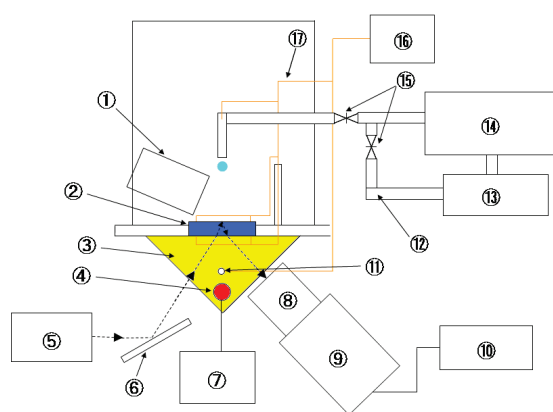
以上より、素過程「過熱面上に発生する局所的固液接触の限定抑制」に関わる固体側(過熱面)と液体側(固液接触界面とバルク液体)の連成機構を検討し、局所的固液接触が濡れ面 or 乾燥面になるかの臨界条件を物理的に把握する。

3. 研究の方法

(1) 過熱面上の局所固液接触状況可視化計測実験

図1に実験装置の概略図を示す。透明熱媒体油としてシリコンオイル(信越化学 KF968、100 cs、屈折率 1.403)を満した三角柱の容器中央上部に、透明な固体板(単結晶サファイア、50×50×5 mm、屈折率 1.768)を設置した。シリコンオイルは、カートリッジヒーターにより最高温度 300 °Cまで加熱される。過熱面として単結晶サファイアを選定したのは、透明で高熱伝導性(常温で $k = 42 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$)を有するからである。サファイア面上に、試験液タンクから微小流量定量ポンプにより供給される蒸留水を、内径 0.2mm のステンレス管から液滴として落下させた。その時の固液接触状況を、過熱面(サファイア面)裏側から高速度ビデオカメラを用い記録した。温度計測はK型熱電対を用い、サファイア表面と裏面でそれぞれ2ヶ所、試験液タンク内、液滴パイプ内にそれぞれ1ヶ所ずつ、オイル内にシース多点熱電対で2ヶ所設けて、データロガーに記録した。

サファイア板裏面から固液接触状況を可視化する原理は次の通りである^{[4][5]}。光源か



①Digital Video Camera ②Sapphire Plate ③Silicone Oil ④Cartridge Heater ⑤Metal Halide Lamp ⑥Mirror ⑦Volt Slider ⑧Micro Nikkor Lens ⑨High Speed Video Camera ⑩Personal Computer ⑪Multipoint Thermocouples ⑫Hose ⑬Tank ⑭Pump for Small Flow Rate ⑮Valve ⑯Data Logger ⑰Thermocouple

図1 可視化実験装置の概略

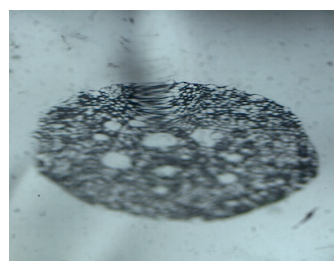


図2 局所的固液接触の可視化画像

らでた光を、ミラーによって適切な入射角度でサファイア板に入射させ、濡れ領域では入射光がサファイア板から液体を通過するように、乾燥領域では入射光がサファイア板表面で全反射させた。その結果、図2にその一例を示すとおり、画像としては濡れ領域が暗部、乾燥領域が明部となる。

落下液滴の直径は約 2 mm で、落下高さはサファイア面表面から $H = 10, 90, 160 \text{ mm}$ (衝突直前の落下速度 0.44, 1.33, 1.77 m/s)と変化させた。液温は常温(約 20°C)である。連続的に液滴を落下させる場合には、その時間間隔を 0.5 ~ 1.5 s と変化させた。画像は、1000 frames/s・シャッター速度 1/10000 で撮影した。サファイア表面は、液滴蒸発後に毎回アセトン拭きを行い、同じ状態を維持するよう努めた。以降、液滴がサファイア面上に衝突した時刻を $t = 0 \text{ ms}$ とし、液滴衝突直前のサファイア表面温度を、初期表面温度 $T_{wi} \text{ [}^\circ\text{C]}$ と表す。

(2) 過熱面上局所固液接触発生時の過渡熱伝プロセス数値解析

①基礎式： 非定常熱伝導解析の対象は、表面に局所的固液接触が発生している過熱面(固体板)である。(1)の可視化実験により取得された濡れ外部境界の形状がほぼ円形であったので、固体板は濡れ外部境界より十分大きな円板とし、式(1)に示すような円筒座標 $(r-\theta-z)$ 系の熱伝導方程式を陰解法的に解いた。ここで、 ρ : 固体密度 [kg/m^3]、 c : 固体比熱 [$\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$]、 k : 固体熱伝導率 [$\text{W/(m}\cdot\text{K)}$]、 T : 固体温度 [K]、 t : 時間 [s]、 r : 半径方向座標 [m]、 θ : 周方向角度 [rad]、 z : 高さ方向座標 [m]、である。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(k \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

格子分割数は、後述の表面発泡点の境界条件設定を可能とするよう、 r 方向に 50、 θ 方向に 100、 z 方向に 100 分割した。計算刻み時間は 0.1ms とした。また、 $r-\theta$ 平面において、中心セルの温度は同じ高さでの周囲格子点全ての平均温度とした。

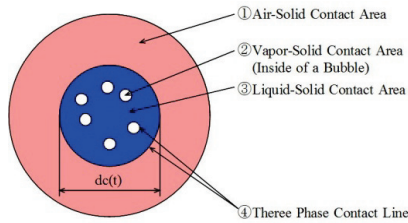


図3 過熱面上上面表面の境界条件

②境界条件： 過熱面（円板）の各面の境界条件について述べる。局所的固液接触が発生している上面表面の境界条件設定方法が重要となる。

＜上面表面＞ 上面境界条件は、図3に示すように1～4の4つの領域に分けて設定した。後述のように全て熱伝達率を設定する形になっている。図中、 $dc(t)$ が濡れ外部境界の直径（時間の関数）を指す。濡れ外部境界内の白い点が乾燥点に該当する。

1. 固気接触境界条件： 濡れ外部境界外の部分は、固体表面と外気の接触を想定し、自然対流熱伝達率（一定値）とふく射熱伝達率（放射率 1）を与えた第二種境界条件とした。流体（外気）側の代表温度は 20°C とした。

2. 乾燥点内部の固気接触境界条件： 濡れ外部境界内の乾燥点内部は完全に乾いているものと仮定し、固体表面と乾き飽和蒸気の接触を想定し、1.と同様に自然対流熱伝達率（一定値）とふく射熱伝達率（放射率 1）を与えた第二種境界条件とした。流体（蒸気）側の代表温度は大気圧水の飽和温度 (100°C) とした。なお、乾燥点は $2 \times 2 = 4$ つの格子で表現し、その大きさ（格子数）は一定とした。乾燥点個数は可視化結果に基づき数十個/ cm^2 とし、ランダムに配置した。

3. 固液接触面内境界条件： 初期温度の異なる2つの半無限固体接触時の非定常熱伝導については解析解がある。その解析解から、固体と液体の接触界面温度と液体代表温度差に対応する見かけの熱伝達率が得られるが、計算負荷等の問題から、その時間平均熱伝達率（一定値）を第二種境界条件として設定した。

4. 三相界線境界条件： 三相界線は、濡れ外部境界の外周部と、各乾燥点周りが該当する。三相界線近傍の熱伝達特性は不明な点が多いが、本研究では西尾・田中の高熱流束プール沸騰熱伝達モデル^[9]で採用された Labuntsov らの関係式(2)を用いる。界線単位長さ当たりの伝熱量 Ψ [W/m] が、非沸騰吸着層厚さ y_A 、三相界線蒸発有効厚さ Δ 、接触角 θ 、液体の熱伝達率 k_l 、および表面過熱度 ΔT の関数として表現されている。

$$\Psi = \left(\log \frac{\Delta}{y_A} / 2 \sin \frac{\theta}{2} \right) k_l \cdot \Delta T \quad (2)$$

$$(y_A \approx 10^{-7} \sim 10^{-8} \text{ cm}, \Delta \approx 10^{-2} \text{ cm}, \theta \approx 60^{\circ})$$

この式から、三相界線に該当するセルの熱伝達率を設定した。

＜側面と下面表面＞ 円板側面は断熱（第三種境界条件）とした。また、下面表面は温度一定（第一種境界条件）とした。その設定温度は、上面表面に局所的固液接触が全く無い場合には自然対流とふく射で放熱されるが、その上面表面温度が初期設定温度になるような温度である。

＜局所的固液接触の大きさと時間＞ 可視化実験により得られる局所的固液接触領域（濡れ外部境界）直径の時間変化 $dc(t)$ は、ある時間 t_{max} 経過後に最大直径 dc_{max} に至り、その後縮小し消滅する。本研究では近似的に、 $dc(t)$ は時間に比例し増減する（固液接触時間は $2t_{\text{max}}$ ）ものとし、 t_{max} と dc_{max} を初期固体表面温度の関数として近似してプログラムに代入した。 t_{max} と dc_{max} 共に、初期固体表面温度の増加に伴い減少する。

＜参考文献＞

[9] 田中・西尾，機論(B編)，69-683 (2003)，1659.

4. 研究成果

(1) 可視化実験

図4は、液滴を1滴落下させた場合に、局所的な固液接触領域の最大値 dc_{max} を初期表面温度 T_{wi} に対してプロットしたものである。最大固液接触直径は、初期表面温度の増大に伴い減少し、落下高さ（衝突速度）の増大に伴い増大することが分かる。

この状況をベースとして、初期表面温度 230°C 、時間間隔 1.0s にて連続的に液滴を落下させた場合の固液接触直径時間変化を図5に示す。(a)は落下高さが 10mm の場合、(b)は 160mm の場合であり、各図中には1滴目から5滴目までの計測値を示した。 $H=10\text{mm}$ の場合、1～4滴目までは液滴衝突後 $16 \sim 25\text{ms}$ 後に一旦は固液接触は消滅し、しばらく後にまた固液接触が観察される。しかし5滴目では、固液接触領域は小さくはなるものの消滅に

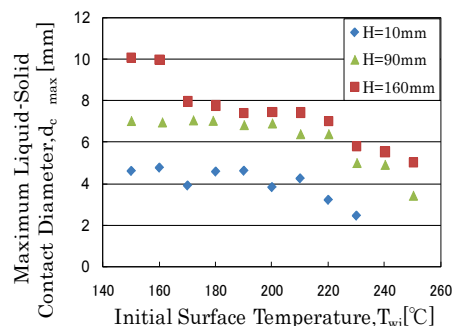
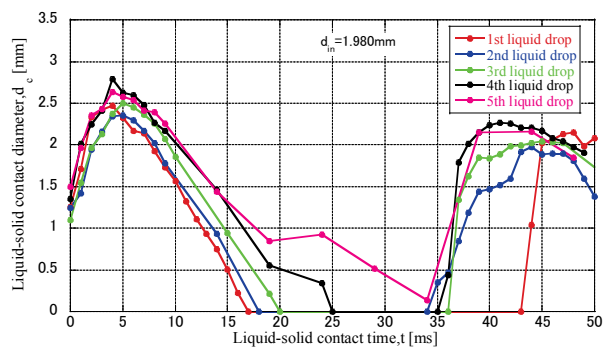
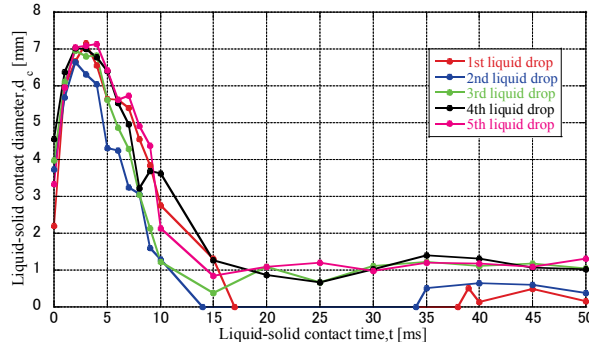


図4 初期過熱面表面温度と固液接触領域最大値 dc_{max} の関係



(a) H=10mm



(b) H=160mm

図5 液滴が $\Delta t=1s$ 間隔で衝突する場合の固液接触領域直径の時間変化 ($T_{wi}=230^{\circ}C$)

は至らない。これは、1 滴の液滴衝突での固液接触により局所的な伝熱=局所的な過熱面の温度低下が発生し、連続的に液滴が衝突するため過熱面の温度回復が完全にはなされず、衝突前の過熱面表面温度が徐々に低下したためと考えられる。この傾向は $H=160mm$ の場合も同様であり、3 滴目の衝突から固液接触領域の消滅が見られなくなった。これは 1 滴衝突・接触あたりの伝熱量が増大したため、 $H=10mm$ と比べて温度低下量が大きいからと解釈できる。

なお図示はしないが、固液接触領域内の発泡点密度の時間変化を画像計測し、 10^6 個/ m^2 であることを確認した。

(2) 数値解析

数値解析結果の一部を図6～8に示す。これらは上面表面中心温度の時間変化を示したものである。

図6は、固体表面初期温度 $500K$ 、水滴落下高さ $160mm$ 、液温 $20^{\circ}C$ 、液滴落下の時間間隔 $20ms$ の条件下で、固体材質を銅、サファイア、石英ガラスと変化した場合の結果である。例えば石英ガラスの結果を見ると、表面中心温度は固液接触発生後に数十 K 急速に低下するが、固液接触時間は液滴衝突後 $10ms$ 未満であるため、その後はゆるやかに温度回復する様子が分かる。しかし、初期温度に回復する前に次の液滴が衝突するため、表面温度は

回復しない。一方、銅の結果を見ると、数 K 程度のわずかな表面温度変動があるだけであり、このまま連続的に液滴が衝突しても、表面温度は初期値を維持する。

図7は、固体材質がサファイアの場合で、液滴落下高さを $10mm$ 、 $90mm$ 、 $160mm$ と変化させ、その他の条件は図6と同じ条件での計算結果である。水滴落下高さは、計算上、局所的固液接触の最大直径 d_{cmax} に影響を及ぼし、落下高さが大きいほど最大直径は増大する。図より、落下高さが大きいほど表面中心温度の低下が大きくなる様子が表されている。

図8は、固体材質が石英ガラスの場合で、固体表面初期温度を $600K$ 、 $550K$ 、 $500K$ と変化させ、その条件は図6と同じ条件での計算結果である。表面初期温度の変化は、固液接触最大直径 d_{cmax} や固液接触時間 $2t_{max}$ に影響を及ぼすと同時に、固液接触時の固液温度差にも変化が生じ、結果として初期温度が低いほど、ある時間経過後の表面温度が大きくなっていることがわかる。

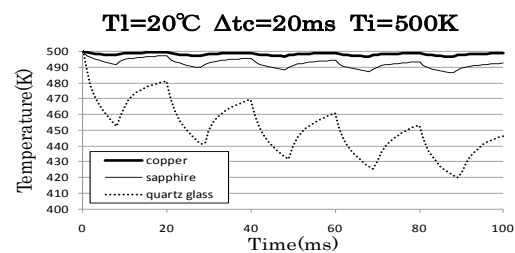


図6 上面表面中心温度の時間変化（固体面材質の影響）

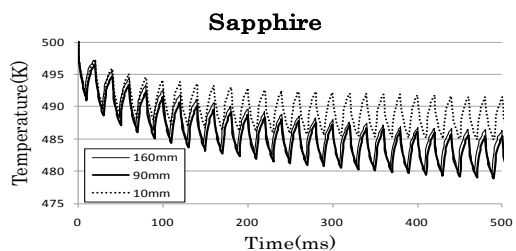


図7 上面表面中心温度の時間変化（液滴落下高さの影響）

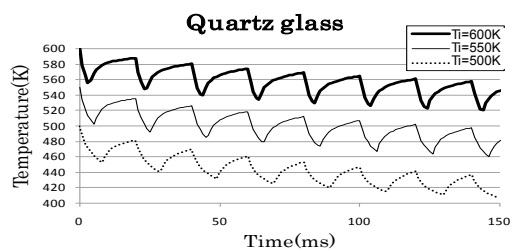


図8 上面表面中心温度の時間変化（固体面初期温度の影響）

図9は、連続的に液滴が衝突する時に、固体表面が乾燥面を維持できなくなり濡れ拡大に至る臨界条件を求めた一例である。図6と同様の条件で、固体材質と表面初期温度を変えて計算した。ある時間経過後に表面中心の過熱度が100K(水のMHF点過熱度最小値に相当)以下になる場合を濡れ拡大として×、それ以外を○と表示してある。このマップ図より、材質と表面初期温度の違いから、○が×に移行する臨界条件(太い実線)が存在することを表現できた。

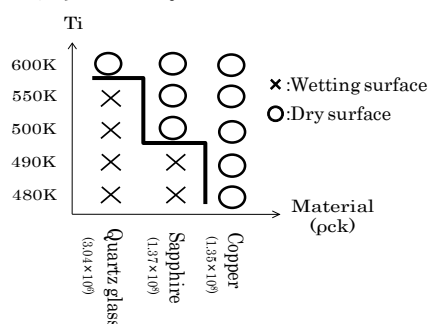


図9 乾燥面が濡れ面に移行する臨界条件の一例(固体面材質と表面初期温度の影響)

(3) 研究成果まとめ

まず、過熱面上に発生する局所的固液接触の可視化に成功し、その諸量を計測した。初期表面温度が高くなる程、また液滴衝突速度が小さくなる程、固液接触領域直径 d_c は小さくなる(限定抑制される)ことが分かった。また、ある初期表面温度範囲において、 d_c は接触後に拡大→極大→縮小といった経過をたどる。その極大値 d_{cmax} は、初期表面温度の増大に伴い減少し、270℃で急減少した。また、 d_{cmax} は液滴衝突速度の増大に伴い、比例的に増加した。

次に、過熱面上局所敵固液接触発生時の過渡伝熱プロセスを数値解析するプログラムを構築し、表面局所温度変動に様々なパラメーター(固体面材質、液体種類、液温、液滴落下高さ、液滴落下時間間隔)が及ぼす影響を把握することが出来た。さらに、乾燥面が濡れ面へ移行する臨界条件として、表面中心温度が水のMHF点温度を下回るかどうかで判別することにより、様々なパラメーターが変化した場合の濡れ面移行の臨界条件を示すマップ図を作成することに成功した。

今後、発泡点(乾燥面)の拡大や表面酸化膜の影響考慮等の改良を施し、計算対象を衝突噴流系に拡張する予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

① Niro Nagai, Takenori Matsumura, Shingo

Yamaguchi, Yasuyuki Maeda, Kazuhiko Ikebata, Liquid-Solid Contact at Evaporation of Water Liquid Droplet Emulsified with Lubricant and Its Adhesion Situation, Proc. 14th International Heat Transfer Conference, 査読有, DVD-R, 2010, pp. 1-7

[学会発表](計9件)

① 永井二郎、奥野敬太、過熱面上局所的固液接触発生時の伝熱過渡プロセス数値解析、第48回日本伝熱シンポジウム、2011年6月2日、岡山コンベンションセンター

② 奥野敬太、永井二郎、高温面上で固液接触発生時の過渡伝熱プロセス数値解析、日本機械学会北陸信越支部第48期総会・講演会、2011年3月5日、信州大学繊維学部

③ Keita Okuno, Niro Nagai, Numerical Simulation of Heat Transfer Transient Process of Liquid-Solid Contact on Superheated Surface, 2010 International Symposium on Advanced Mechanical and Power Engineering, 2010年11月12日、福井大学

④ 永井二郎、山田哲也、奥野敬太、過熱面上に液滴衝突時の固液接触状況の観察と諸量の計測、第47回日本伝熱シンポジウム、2010年5月27日、北海道札幌コンベンションセンター

⑤ 永井二郎、山田哲也、奥野敬太、過熱面上に液滴衝突時の固液接触状況の観察、日本機械学会熱工学コンファレンス、2009年11月8日、山口大学常盤キャンパス

⑥ 永井二郎、エマルジョン水滴蒸発時の固液接触と油成分付着状況、日本機械学会関西支部第10回秋季技術交流フォーラム、2009年10月17日、大阪府立工業高等専門学校

⑦ 奥野敬太、山田哲也、永井二郎、過熱面上に液滴衝突時の固液接触状況の観察、日本伝熱学会北陸信越支部2009年春季セミナー、2009年5月9日、富山大学工学部

⑧ 永井二郎、沸騰冷却時の固液接触限定抑制機構と濡れ性に関する検討、日本鉄鋼協会第156回秋季講演大会、2008年9月24日、熊本大学

⑨ 永井二郎、高温面上の濡れ性と接触角に関する検討、日本機械学会2008年度年次大会、2008年8月5日、横浜国立大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

永井 二郎 (NAGAI NIRO)

福井大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 70251981

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し